بررسی اثرات پارامترهای هندسی و مکانیکی توربین بادی محور افقی بر رفتار دینامیکی آن در حالت آزاد و اجباری*

(یادداشت پژوهشی)

علیرضا شوشتری[۱]   کوروش هاشمی[۲]

چکیده در این پژوهش از تئوری تیر جدارنازک، تغییر شکل نقطهٔ دلخواهی از سازهٔ توربین باد محور افقی استخراج و با روش اجزای محدود، روابط انرژی جنبشی و پتانسیل اجزای آن به‌دست آمده است. پاسخ میرای سازه در حالت ارتعاش اجباری یکبار تحت اثر نیروهای آیرودینامیکی، گریز از مرکز و اثر وزن و بار دیگر تحت تحریکات تکیه‌گاهی هارمونیک و اتفاقی به‌دست آمده است. از تئوری فوق، برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب تهیه شده است که می‌تواند انواع سازه‌های توربین باد محور افقی را تحلیل نماید. تحلیل مدل‌های مختلفی از سازه اثر تغییرات طول، جنس، سرعت دورانی پره‌ها و سرعت وزش باد بر سازه مشخص کرده‌اند. مدل‌سازی و تحلیل برج سازه در نرم‌افزار انسیس نتایج پژوهش را تصدیق نموده است.

واژه‌های کلیدی سازهٔ توربین باد محور افقی; تئوری تیر جدارنازک ;تحریک هارمونیک; تحریک اتفاقی.

Investigation of the Effect of Geometrical and Mechanical Properties of Horizontal Wind Turbines on its Dynamic Behavior for Free and Forced Vibration Cases

A. Shooshtari   K. Hashemi

Abstract *In this paper, using thin wall beam theory, at first the deflection of an arbitrary point of a horizontal wind turbine has been determined. Then, calculating potential and kinetic energy of wind turbine structure and using Lagrange equations, the equations of motion have been derived. Also, forced vibration of structures under various excitation such as aerodynamic forces, centrifugal effects, weight of elements and base excitation have been investigated. Finally, the effects of lengths, material and angular velocity of blades and wind speed on dynamic behavior of structure have been investigated. For validation, the tower of turbine has been modeled and analyzed in ANSYS software and good agreement between the obtained results and the proposed method has been observed.*

Key Words Horizontal axis wind turbine; Thin walled beam theory; Harmonic actuation; random actuation.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۶/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشیار ، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان. shooshta@basu.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

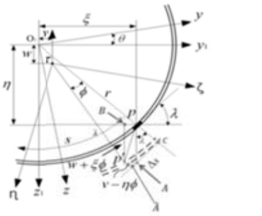
مقدمه

گرایش به استفاده از انرژی باد موجب شد، تا تحقیقات گسترده‌ای در زمینهٔ سازهٔ توربین باد و به‌خصوص طراحی دینامیکی آن انجام شود. چوپرا و دوگوندجی [1] پژوهشی را در زمینهٔ معادلات غیرخطی حرکت پرهٔ توربین باد به انجام رسانده‌اند. در پژوهش دیگری مدلی سه‌بعدی از پره‌های توربین باد مذکور به روش اجزای محدود و تحت اثر نیروی‌های برا و پسا توسط چازلی [2] ارائه شد. یونسی و همکارانش [3] از مدل یک تیر سه‌بعدی برای مدل‌سازی پره‌ها استفاده کرده‌اند. بامگارت [4] تحلیل پرهٔ توربین باد را با استفاده از یک مدل ریاضی از پرهٔ توربین باد بر روی یک پایهٔ صلب انجام داده است. مورتاگ و همکارانش [5] مسیری برای پیش‌بینی پاسخ اجباری توربین باد تحت اثر نیروی باد ساکن پیشنهاد نمودند. پارک و همکارانش [6] پژوهشی در زمینهٔ ارتعاشات خطی توربین باد به‌منظور جلوگیری از پدیدهٔ رزونانس به‌انجام رسانده‌اند. باکسوانو و همکارانش [7] محاسبهٔ پاسخ آیروالاستیک ایرفویل توربین باد دوبعدی را انجام داده‌اند. هوگدرن و همکارانش [8] پژوهشی به‌منظور بررسی پاسخ پرهٔ توربین باد در دو حالت گذرا و پایدار انجام داده‌اند. نهایتاً وانگ و همکارانش [9] سازهٔ توربین باد محور افقی را به‌صورت دینامیکی تحلیل نموده‌اند.

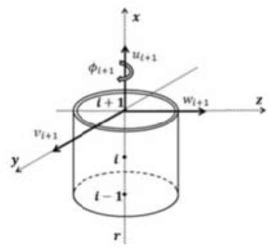
در ابتدا با استفاده از مدل پژوهش وانگ و همکارانش [9] طرحی از سازهٔ توربین باد شامل برج، دو پره و نیز جرمی متمرکز در نوک برج به‌منظور اعمال اثر موتور و اجزای داخلی آن بر سازهٔ توربین باد، معرفی شده است. در این طرح با فرض تیر جدارنازک بودن برج و پره‌ها و سپس استفاده از تئوری تیرهای جدارنازک بردار جابه‌جایی نقطهٔ دلخواهی از سازه به‌دست آمده است. با نسبت دادن سیستم‌های مختصات محلی به هر یک از اجزای سازه و استفاده از روش اجزای محدود و انتخاب المان‌هایی با چهار درجه آزادی برای پره‌ها و یک درجه آزادی برای برج، روابط انرژی جنبشی و پتانسیل آنها استخراج شده است. در گام بعدی اثر باد با سرعت ثابت، نیروی گریز از مرکز و وزن سازه با استفاده از روش کار مجازی به‌دست آمدند. با انتقال سیستم‌های مختصات محلی به سیستم مختصات عمومی سازه و استفاده از معادلات لاگرانژ، معادلات دیفرانسیل حرکت نامیرای سازه استخراج و با افزودن میرایی تناسبی به سازهٔ مذکور معادلات دیفرانسیل حرکت میرای سازهٔ توربین باد حاصل شده است. سپس پاسخ سازهٔ برج تحت تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک اعمالی به پایهٔ برج به‌دست آمده است. سپس به‌منظور بررسی لرزش‌های اتفاقی نظیر زلزله، سازه مذکور تحت پنج تحریک تکیه‌گاهی اتفاقی نیز تحلیل شده است. هم‌چنین برای بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی نظیر طول و جنس پره‌ها، سطح مقطع برج و نیز اثر نیروهای خارجی، مدل‌های متعددی از سازهٔ توربین باد به روش مذکور تحلیل شده و نتایج حاصل از هر قسمت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش، سه مدل از برج سازه، با استفاده از تئوری پژوهش و به‌کمک نرم‌افزار انسیس تحلیل شده‌اند، که نتایج حاصل از این دو تحلیل کاملاً با یکدیگر تطابق داشته‌اند. لازم به ذکر است که تحلیل دینامیکی سازهٔ توربین باد محور افقی در چهار راستای طولی، عرضی، جانبی و زاویه‌ای به‌همراه بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی، تحت تحریک ناشی از نیروهای آیرودینامیکی، نیروهای گریز از مرکز، اثر وزن و نیز تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک و اتفاقی برای اولین بار در این پژوهش به انجام رسیده است. از تئوری این پژوهش برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب تهیه شده است، که قابلیت تحلیل ارتعاشی انواع سازه‌های توربین باد محور افقی را فراهم می‌کند.

مدل‌سازی سازهٔ توربین باد محور افقی

سینماتیک تیر جدارنازک. در شکل (۱) جابه‌جایی محیطی نقطهٔ دلخواه P روی جدارهٔ تیر به‌اندازهٔ Δs در راستای s و انتقال آن به نقطهٔ P'، که در آن v و w به‌ترتیب جابه‌جایی در راستای y_1 و z_1 می‌باشد، دیده می‌شود. به‌دلیل فرض جدارنازک و کشسان بودن سازهٔ توربین باد، اثر تنش برشی ε_{xs} در تغییر شکل نهایی بسیار کوچک است و می‌توان از آن صرف نظر نمود.



شکل ۱ سطح مقطع تیر جدارنازک [9]



شکل ۲ المان تیر جدارنازک

با استفاده از شکل (۱) و تعریف تنش برشی ε_{xs} جابه‌جایی نقطهٔ P یعنی ΔP به‌صورت رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید [9].

$$\Delta P = D_1 \begin{Bmatrix} q \\ 1 \end{Bmatrix} + D_2 \begin{Bmatrix} q' \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (۱)$$

که در آن q بردار تغییر شکل و q′ مشتق آن می‌باشد و به‌صورت رابطهٔ (۲) تعریف می‌شوند.

$$\boldsymbol{q} = \{u \quad v \quad w \quad \phi\}^T \qquad (۲ الف)$$

$$\boldsymbol{q}' = \{u' \quad v' \quad w' \quad \phi'\}^T \qquad (۲ ب)$$

المان اجزا محدود. با استفاده از المان سه‌گره‌ای تیر جدارنازک مطابق شکل (۲) سازه مدل شده است. توابع شکل المان مذکور به‌صورت رابطهٔ (۳) بیان می‌شوند [10].

$$h_1 = \frac{1}{2}(r^2 - r), \qquad (۳ الف)$$

$$h_2 = 1 - r^2 \qquad (۳ ب)$$

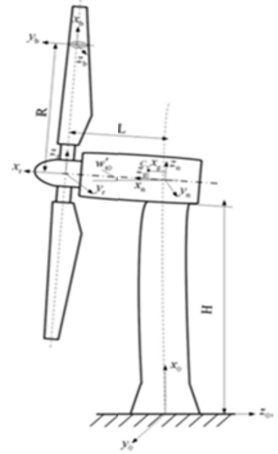
$$h_3 = \frac{1}{2}(r^2 + r) \qquad (۳ ج)$$

در نهایت الگوی تغییر شکل المان فوق (بردار q) به‌صورت رابطهٔ (٤) حاصل می‌شود.

$$q = \sum_{i=1}^{n=3} h_i q_i^e = Hq^e \qquad (٤)$$

که در آن H ماتریس تابع شکل المان مذکور می‌باشد.

سیستم‌های مختصات مفروض بر سازه. مطابق شکل (۳) برای هر یک از اجزای توربین باد یک سیستم مختصات محلی در نظر گرفته شده است [9]. سیستم مختصات عمومی بر پایهٔ برج توربین واقع است و $x_0y_0z_0$ نام دارد. سیستم مختصات $x_ny_nz_n$ به موتور و اجزای داخلی آن تعلق دارد. در مرکز شفت پروانه‌ها سیستم مختصات $x_ry_rz_r$ برای روتور فرض شده است. سیستم مختصات $x_by_bz_b$ بر روی پره و در فاصلهٔ R از مرکز روتور قرار داده شده است.



شکل ۳ مدل سازهٔ توربین باد محور افقی [9]

انرژی جنبشی و پتانسیل پره‌ها، برج و موتور سازه. به‌کارگیری ماتریس انتقال کشسان T_f و ماتریس تبدیل مختصات T_r بردار موقعیت و جابه‌جایی پره را به‌ترتیب به‌صورت روابط (٦ و ٥) ایجاد می‌کند [9, 11, 12].

$$P_b = T_f \cdot (B_1 \begin{Bmatrix} q_b \\ 1 \end{Bmatrix} + B_2 \begin{Bmatrix} q'_b \\ 0 \end{Bmatrix}) \quad (٥)$$

$$\Delta P_b = \begin{Bmatrix} \Delta x_b \\ \Delta y_b \\ \Delta z_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ S_{13} \end{Bmatrix} q_b + \begin{Bmatrix} S_{21} \\ S_{22} \\ S_{23} \end{Bmatrix} q'_b \quad (٦)$$

به‌همین صورت بردار موقعیت برج P_t و موتور P_n به‌ترتیب از روابط (٨ و ٧) حاصل می‌شوند [9].

$$P_t = \begin{Bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \\ \Delta z_t \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w'_{to}\eta_t \\ \xi_t \\ \eta_t \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (٧)$$

$$P_n = \begin{Bmatrix} z_g + H - w'_{to}x_g \\ 0 \\ -w'_{to}(z_g + H) - x_g \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (٨)$$

سپس با استفاده از روابط فوق انرژی جنبشی و پتانسیل اجزای توربین باد استخراج می‌شوند [9].

معادلهٔ دیفرانسیل حرکت سازه. معادلهٔ دیفرانسیل حرکت سازه براساس معادلات لاگرانژ به‌صورت رابطهٔ (٩) به‌دست می‌آید.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} = Q \quad (٩\text{- الف})$$

$$K = K_b + K_t + K_n \text{ و } U = U_b + U_t \quad (٩\text{- ب})$$

$$[M]\ddot{q} + [K]q = \{Q\} \quad (١٠)$$

رابطهٔ (١٠) فرم ماتریسی آن می‌باشد؛ که در آن $q = \{q_t \quad q_{b1} \quad \cdots \quad q_{bN}\}^T$ بردار جابه‌جایی کل سازه، $q_b = \{q_{b1} \quad q_{b2} \quad \cdots \quad q_{bn_b}\}^T$ بردار جابه‌جایی پره‌ها، $q_t = \{w'_{tn_t} \quad w'_{t(n_t-1)} \quad \cdots \quad w'_{t0}\}^T$ بردار جابه‌جایی برج، $q_{tn_t} = \{w'_{tn_t}\}^T$ بردار جابه‌جایی گره n_tام برج و $q_{bn_b} = \{u_{bn_b} \quad v_{bn_b} \quad w_{bn_b} \quad \emptyset_{bn_b}\}^T$ بردار جابه‌جایی گره n_b ام پره‌ها و ماتریس‌های [M] و $[K]$ و $\{Q\}$ به‌ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی و نیروهای خارجی سازه می‌باشند.

تحلیل سازهٔ توربین باد محور افقی

در این پژوهش سازهٔ توربین بادی محور افقی، شامل برجی به طول ٣٤/٨٦٢ متر (٣٠ المان) و دو پره از مدل $NREL\ S809$ به طول ٢١/٣٣٦ متر (١٨ المان) مطابق جدول (٣- پ)، به‌عنوان مدل اصلی انتخاب شده است.

دیگر طرح‌های تحلیل شده در این پژوهش عبارتند از: طرح ١: طرحی است که سطح مقطع برج آن نسبت به مدل اصلی با کاهش قطر خارجی سطح مقطع برج به اندازهٔ ٠/٠١٨ متر نسبت به طرح اصلی، کاهش یافته است. طرح ٢: طرحی است که سطح مقطع برج آن نسبت به مدل اصلی با کاهش قطر داخلی سطح مقطع برج به اندازهٔ ٠/٠١٩ متر نسبت به طرح اصلی، افزایش یافته است. طرح ٣ و طرح ٤: در این دو طرح طول پره‌های سازهٔ توربین باد نسبت به طرح اصلی به‌ترتیب ١٠ درصد کاهش و ١٠ درصد افزایش یافته است. طرح ٥ و ٦: طرح‌هایی هستند که در آنها پره‌ها به‌ترتیب از جنس فولاد و آلومینیوم ساخته شده‌اند. توجه شود که اتصال برج، موتور و پره‌ها به‌صورت صلب در نظر گرفته شده است یعنی پره‌ها ساکن هستند. سپس اثر دوران پره‌ها به‌صورت نیروی خارجی به سازه اعمال گشته است.

جدول ۱ فرکانس‌های طبیعی مدل اصلی (هرتز)

توضیح	طرح اصلی	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ٤	طرح ٥	طرح ٦
فرکانس اولین خمش برج	۰/۵۸۷۸	۰/٤۵۸۱	۰/۵۱۱۱	۰/٦٦٦۵	۰/٦۸۵۱	۰/۱۹۲۲	۰/۵۳٤٤
فرکانس اول تغییر شکل طولی نا متقارن پره	۱۵/٦۷۲۵	۱۵/٦۷۲۵	۱۴/۲٤۷۷	۱۵/٦۷۲۵	۱۷/٤۱۳۹	۹۶/٦۳۵۱	۹۹/۱٤۷۷
فرکانس اول تغییر شکل طولی متقارن پره	۱۵/٦۷۸۵	۱۵/٦۷۸۵	۱۴/۲۵۲۲	۱۵/٦۷۸۵	۱۷/٤۲۲۳	۹۶/٦۲٦٦	۹۹/۱۲۵۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی نا متقارن عرضی پره	٤۱/۵٤۵۳	٤۱/۵٤۵۳	۳۷/۷٦۹٦	٤۱/۵٤۵۳	۴۶/۱۵۹۸	۷۷/۹۹۸۳	۷۷/۲۸٤۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی متقارن عرضی پره	٤۲/۰۵۹۱	٤۱/۰۵۹۰	۳۸/۱۸٤٤	٤۲/۰۵۹۱	۴۶/۸۱۰۵	۷۸/۳۳٦۲	۷۸/۱۸۷۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی نا متقارن جانبی پره	۲۲/۰۹٦۵	۲۲/۰۹٦۵	۲۰/۰۸٦۲	۲۲/۰۹٦۵	۲۴/۵۵۸۱	۴۱/٤۵۲۸	۴۱/۰۷۷۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی متقارن جانبی پره	۲۳/۰۹۵۷	۲۳/۰۹۵۵	۲۰/۸۸۱۳	۲۳/۰۹۵۹	۲۵/۸٤۵٦	۴۲/۰۷۵۵	۴۲/۷۹۰۰
فرکانس دوم تغییر شکل طولی نا متقارن پره	۳۱/۸۷۹۳	۳۱/۸۷۹۳	۲۸/۹۸۱۲	۳۱/۸۷۹۳	۳۵/٤۲۱٤	۱۹۶/۵٦٤٤	۲۰۱/٦۷۵۳
فرکانس دوم تغییر شکل طولی متقارن پره	۳۱/۸۸۰۳	۳۱/۸۸۰۳	۲۸/۹۸۲۰	۳۱/۸۸۰۳	۳۵/٤۲۲۷	۱۹۶/۵٦٦۷	۲۰۱/٦۸۳۷
فرکانس دوم تغییر شکل خمشی نا متقارن عرضی پره	۸۷/۲۲۵۸	۸۷/۲۲۵۸	۷۹/۳۰٦۵	۸۷/۲۲۵۸	۹۶/۱٦۷۷	۱۶۲/۹٤۲۷	۱۶۱/۰۷۹۳
فرکانس دوم تغییر شکل خمشی متقارن عرضی پره	۸۷/٤٦۷۷	۸۷/٤٦۷۷	۷۹/۵۱٤۹	۸۷/٤٦۷۷	۹۷/۱۸۷۵	۱۶۳/۱٤٦۵	۱۶۲/۰۷۹۳

جدول ۲ فرکانس حاصل از تئوری و نرم‌افزار انسیس (هرتز)

شرح	تئوری	انسیس	خطا٪
فرکانس طبیعی اول مدل اصلی	۵۱٤/۰٤۸	۵۲۸/۷۷	۲/۷۸٤۱
فرکانس طبیعی دوم مدل اصلی	٦۵۲/۵۹	٦٤۰/۹٤	۱/۸۱٦۷
فرکانس طبیعی اول طرح (الف)	۵۱٤/۸۱	۵۲۸/۹۲	۲/٦٦۷۷
فرکانس طبیعی دوم طرح (الف)	٦۵٦/٤۰	٦٤۱/٦۸	۲/۲۹۳۹
فرکانس طبیعی اول طرح (ب)	۵۰۲/۳۱	۵۲۰/۱۹	۳/٤۳۷۰
فرکانس طبیعی دوم طرح (ب)	٦۳۳/۲۲	٦۲٤/۱۷	۱/٤٤٦۷

جدول ۳ ضرایب تابع خودهمبستگی [17]

شرح لرزهٔ ثبت شده	$T_s(s)$	ϱ
سی دی ای مکزیکو	۳/۵۷	۰/۰۵۰
اس سی تی مکزیکو	۲/۰٤	۰/۰٤۵
وایتر نرو	۰/۳۲	۰/۱
نیسکوالی	۱/۲۲	۰/۰۷۰

ارتعاش آزاد. به‌کمک روش مقادیر ویژه، فرکانس‌های طبیعی سازه، از حل معادلهٔ دیفرانسیل حرکت آزاد سازه که به‌صورت رابطهٔ (۱۱) بیان می‌گردد، حاصل می‌شود.

$$[M]\ddot{q} + [K]q = 0 \tag{۱۱}$$

همان‌گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌گردد، با افزایش طول پره‌ها فرکانس طبیعی اولین شکل مود خمش برج، کاهش می‌یابد. این موضوع ناشی از افزایش جرم مؤثر در نوک برج می‌باشد. از طرفی با افزایش طول پره‌ها سایر فرکانس‌های طبیعی سازه کاهش یافته است. هم‌چنین افزایش سطح مقطع برج موجب افزایش فرکانس طبیعی اولین شکل مود خمشی برج شده در حالی که بر روی فرکانس‌های طبیعی پره‌ها اثر محسوسی نداشته است. تغییر جنس پره‌ها از کامپوزیت به فولاد و آلومینیوم فرکانس طبیعی اولین شکل مود خمشی برج را به‌علت افزایش وزن سازه، کاهش داده است، درحالی که سایر فرکانس‌های طبیعی را افزایش داده است.

اعتبارسنجی نتایج. در ادامه برج سازهٔ توربین باد محور افقی در سه طرح مختلف که عبارت اند از: طرح اصلی، طرح (الف) مدلی با سطح مقطع افزایش یافته (با کاهش قطر داخلی برج به میزان ۰/۰۱۹ متر) و طرح (ب) مدلی که در آن ارتفاع برج به میزان ۱۰ درصد افزایش یافته است، در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی و تحلیل شده است. از این تحلیل فرکانس‌های طبیعی برج و شکل مودهای آن به‌دست آمدند. سپس مدل‌های فوق‌الذکر با تئوری حاکم در این پژوهش نیز تحلیل شدند و دو فرکانس طبیعی اول و نیز شکل مود اول سازه استخراج گردیدند. نتایج مذکور در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

ارتعاش اجباری میرا تحت تحریک نیرویی. با استفاده از روابط کار مجازی ناشی از نیروهای خارجی (مدل‌سازی نیروی باد در مرجع [9] موجود است) و نیز افزودن میرایی تناسبی به‌صورت رابطهٔ (۱۲)، معادلهٔ دیفرانسیل حرکت سازه در حالت تحریک نیرویی به‌صورت رابطهٔ (۱۳) ظاهر می‌گردد، که در آن α' و β' ضرایب ثابتی می‌باشند.

$$[C] = \alpha'[M] + \beta'[K] \tag{۱۲}$$

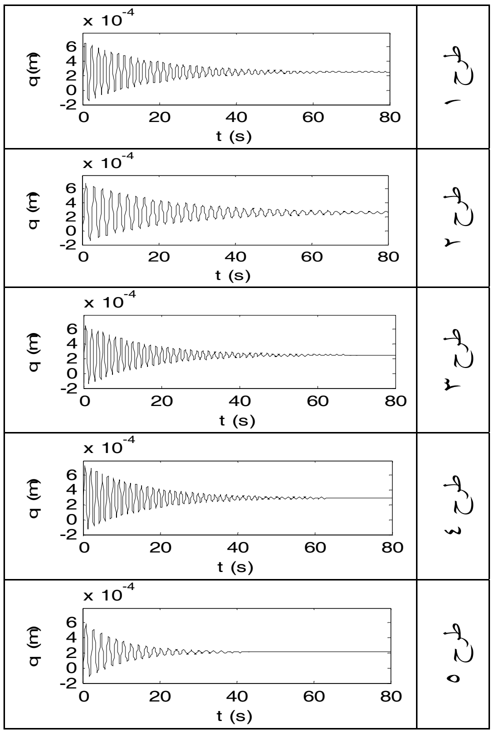
$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = \{Q\} \tag{۱۳}$$

سازهٔ تحت وزش باد با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲٦/۸ دور بر دقیقه پره‌ها (طرح اصلی) و سرعت دورانی ثابت پره‌ها در ۲٦/۸ دور بر دقیقه و افزایش سرعت وزش باد به مقادیر ۲۰ (طرح الف) و ۲۵ متر بر ثانیه طرح (طرح ب)، وزش باد با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه کاهش سرعت دورانی پره‌ها به مقادیر ۱۰/۷۲ دور بر دقیقه (طرح ج) و ۱۷/۸٦ دور بر دقیقه (طرح د) به روش آنالیز مودال تحلیل شده است.

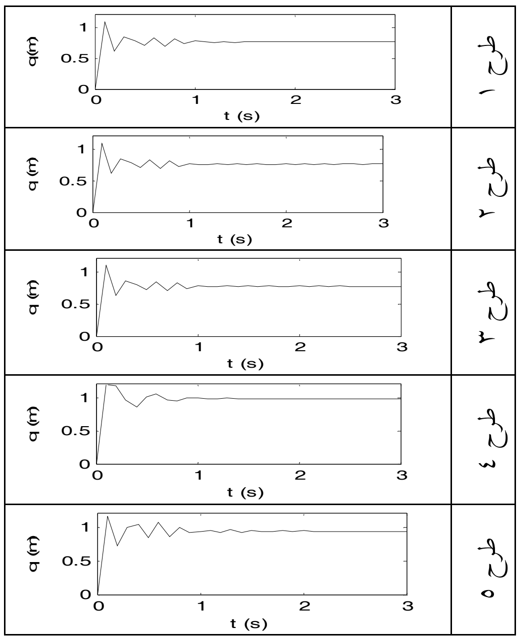
شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش طول پره و با افزایش سطح مقطع برج پاسخ میرا شده نوک برج کاهش یافته است.

همان‌طور که از شکل (٦) مشاهده می‌گردد تغییر در طول پره‌ها موجب افزایش جابه‌جایی نوک طولی پره شده است.

در شکل (۷) دیده می‌شود، مقدار تغییر شکل عرضی نوک پره تحت با افزایش طول پره‌ها افزایش یافته در حالی که با افزایش سطح مقطع برج مقدار تغییر شکل مذکور کاهش می‌یابد.

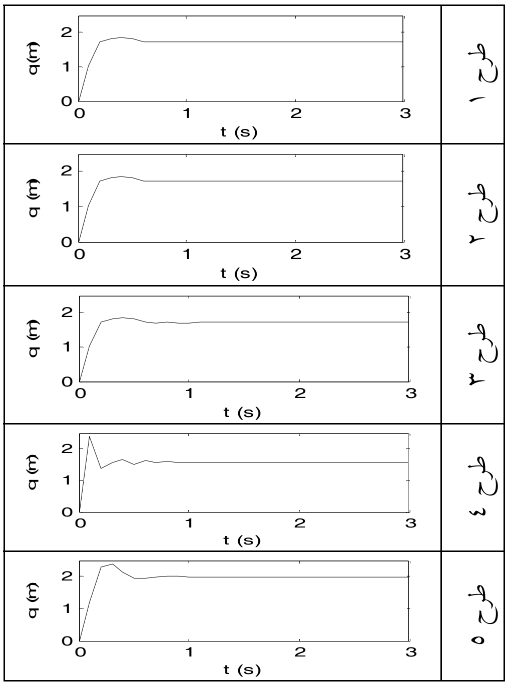


شکل ۵ تغییر شکل نوک برج تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقهٔ پره‌ها

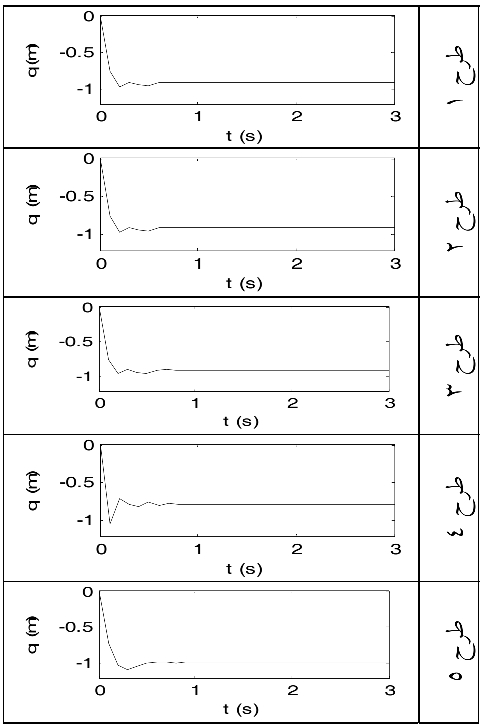


شکل ٦ تغییر شکل طولی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی۲۶/۸ دور بر دقیقهٔ پره‌ها

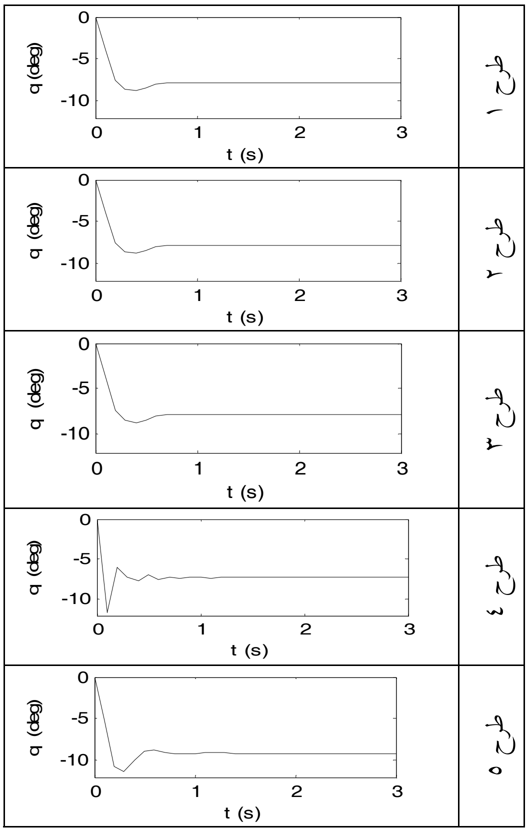
شکل (۸) نشان می‌دهد، افزایش سطح مقطع برج، در جابه‌جایی جانبی نوک پره بی‌اثر بوده و این جابه‌جایی در اثر افزایش طول پره‌ها افزایش یافته است.



شکل ۷ تغییر شکل عرضی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقهٔ پره‌ها



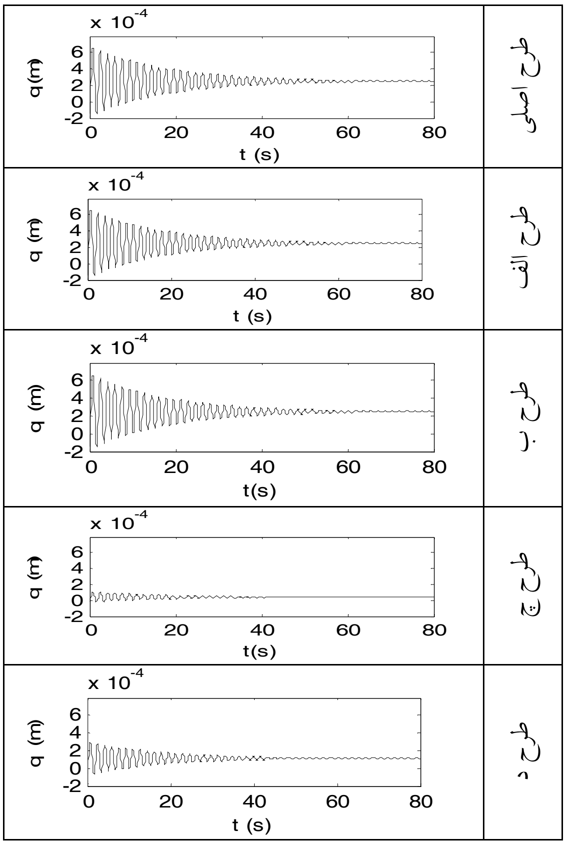
شکل ۸ تغییر شکل جانبی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقهٔ پره‌ها



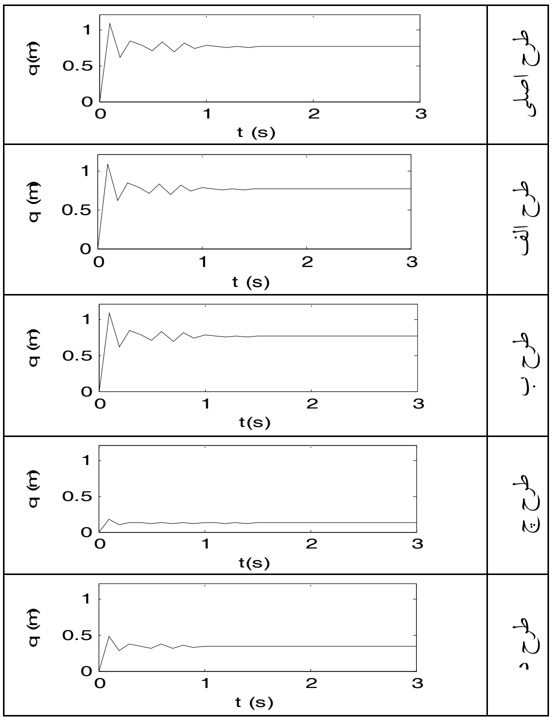
شکل ۹ تغییر شکل پیچشی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی۲٦/۸ دور بر دقیقه پره‌ها

با توجه به شکل (۹) تغییر شکل پیچشی نوک پره در اثر افزایش سطح مقطع برج به میزان کمی کاهش یافته و با افزایش طول پره‌ها این مقدار افزایش داشته است.

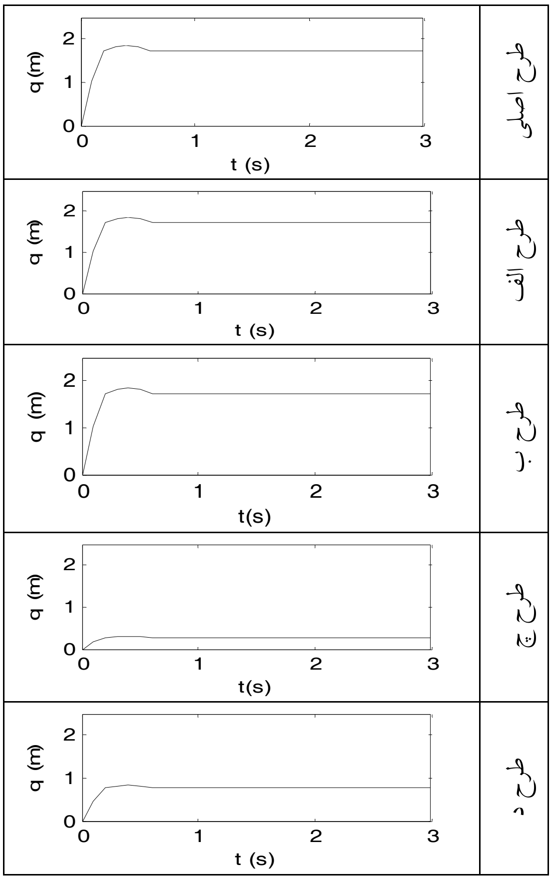
در ادامه پاسخ مدل سازه در شرایط مختلف نیرویی به‌دست آمده است. شکل‌های (۱٤-۱۰) بیان می‌کنند که تغییر پارامتر سرعت جریان آزاد (باد) اثر محسوسی بر روی پاسخ‌ها نداشته است. این درحالی است که در یک سرعت جریان آزاد (باد)، تغییر سرعت دورانی پره اثر بسیار محسوسی بر روی مقدار تغییر شکل سازه داشته است. کاهش سرعت دورانی پره‌ها موجب کاهش شدیدی در مقدار تغییر شکل سازه شده است که بیانگر سهم بسیار زیاد نیروی گریز از مرکز در بردار نیروی مؤثر بر سازه می‌باشد. قابل ذکر است، همواره سرعت دوران پره‌ها پارامتری بحرانی در سازه‌های توربین باد بوده است.



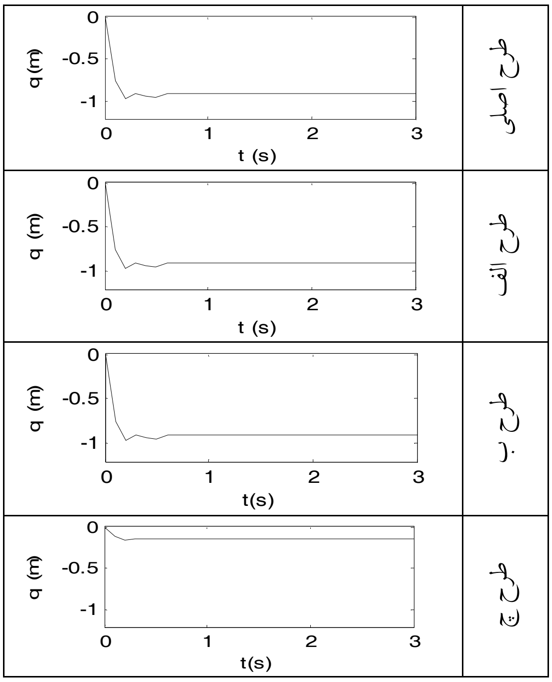
شکل ۱۰ تغییر شکل نوک برج در شرایط مختلف آیرودینامیکی

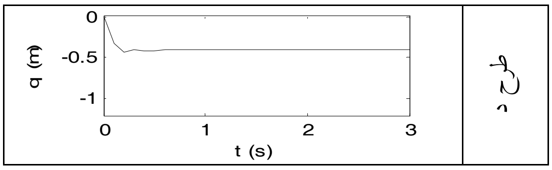


شکل ۱۱ تغییر شکل طولی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی

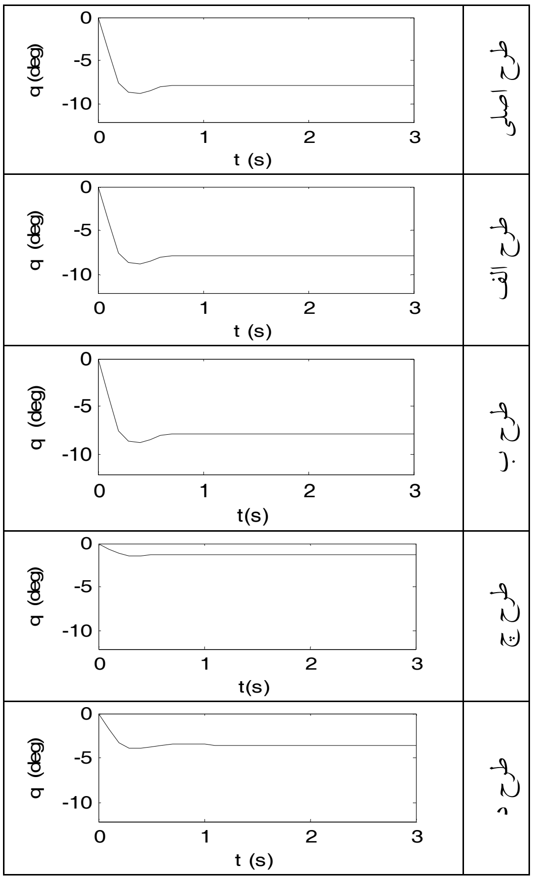


شکل ۱۲ تغییر شکل عرضی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی





شکل ۱۳ تغییر شکل جانبی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی



شکل ۱٤ تغییر شکل پیچشی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی

ارتعاش اجباری میرا تحت تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک. برای مدل‌سازی تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک اعمالی بر سازه، تحریکی شتابی به‌صورت تابع کسینوسی مطابق رابطهٔ (١٤)، در راستای z_o بر پایه برج اعمال می‌گردد، [14, 15].

$$\ddot{y}_i = a_0 \cos(\omega t) \tag{١٤}$$

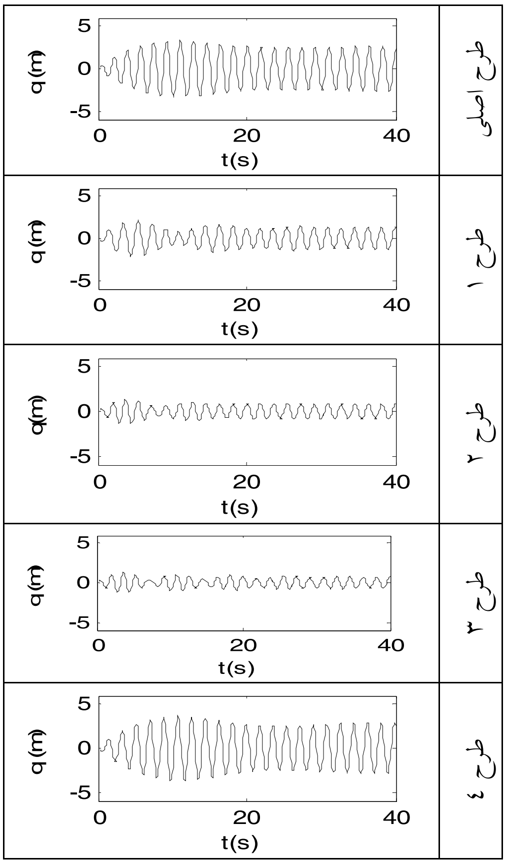
معادلهٔ دیفرانسیل حرکت به‌صورت رابطهٔ (۱۵) تغییر می‌یابد.

$$[M]\ddot{q}_i + [C]\dot{q}_i + [K]q_i = M\ddot{y}_i \qquad (۱۵)$$

در ادامه با استفاده از آنالیز مودال و تبدیل‌های خطی معادلهٔ دیفرانسیل حرکت به‌صورت رابطهٔ (۱٦) تغییر می‌یابد [16].

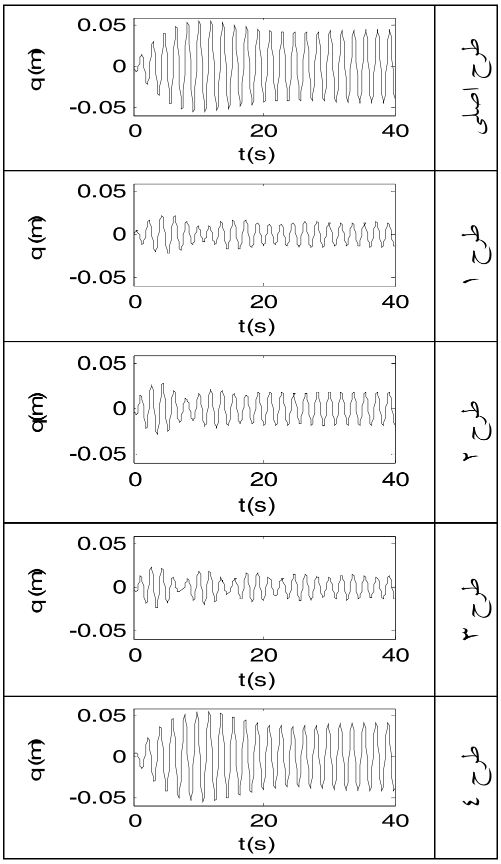
$$\{\ddot{\delta}_i\} + [2\xi\omega_n]\{\dot{\delta}_i\} + [\omega_n^2]\{\delta_i\} = ([u]^T \boldsymbol{M}[u])^{-1}[u]^T \boldsymbol{M}\{\ddot{y}_i\} \qquad (۱٦)$$

معادلات فوق حل و نتایج آن به‌صورت زیر حاصل شده است.



شکل ۱۵ تغییر شکل نوک برج در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی

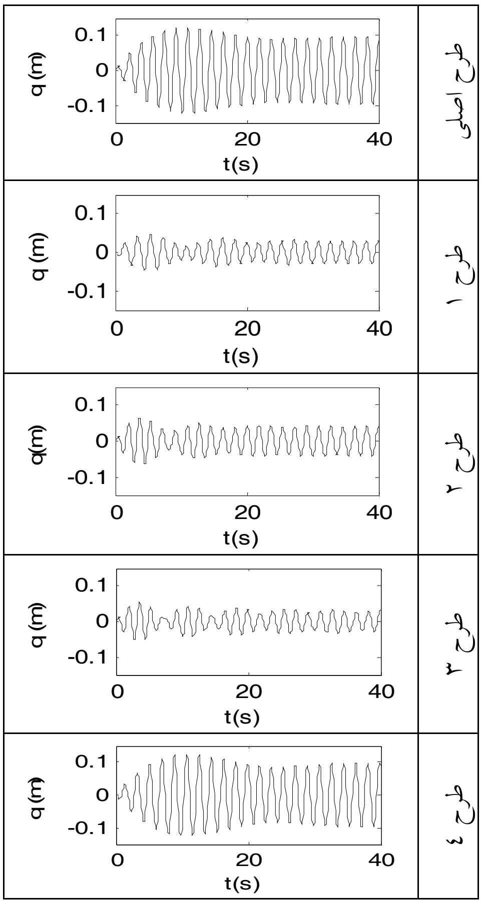
شکل (۱۵) جابه‌جایی نوک برج را بیان می‌کند. از آن‌جایی که فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی اول برج در مدل اصلی نزدیک می‌باشد، سازه به حالت تشدید رسیده و جابه‌جایی نوک برج در مدل اصلی به‌شدت افزایش یافته است. افزایش سطح مقطع برج موجب کاهش دامنهٔ جابه‌جایی نوک برج شده است.



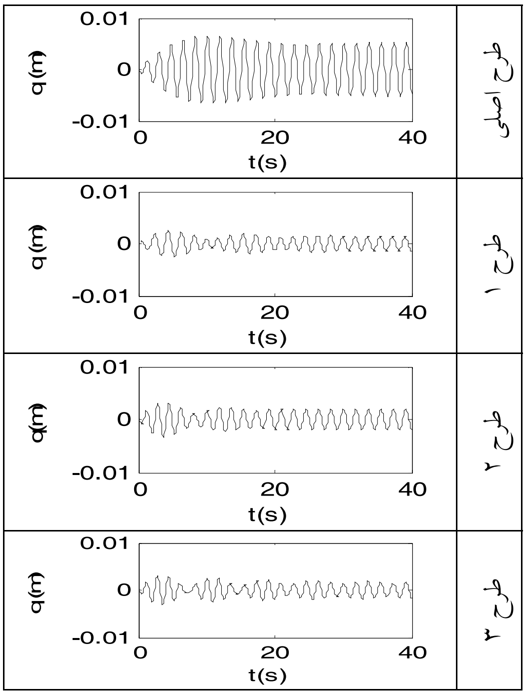
شکل ۱٦ تغییر شکل طولی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی

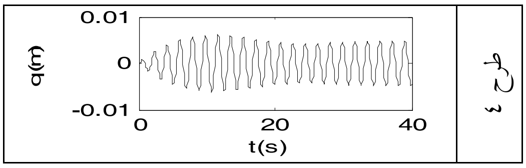
با توجه به شکل (۱٦) قابل ذکر است که تغییر شکل طولی نوک پره، تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی در مقایسه با تغییر مکان نوک برج خیلی کمتر شده و کاهش طول پره‌ها موجب کاهش دامنهٔ تغییر شکل طولی نوک پره شده است.

شکل (۱۷) و مقایسهٔ آن با شکل (۱٦) بیان می‌کند تغییر مکان عرضی نوک پره تقریباً دو برابر تغییرشکل طولی آن است. از طرف دیگر کاهش طول پره نسبت به مدل اصلی تغییر شکل عرضی نوک پره به‌شدت کاهش داده است.

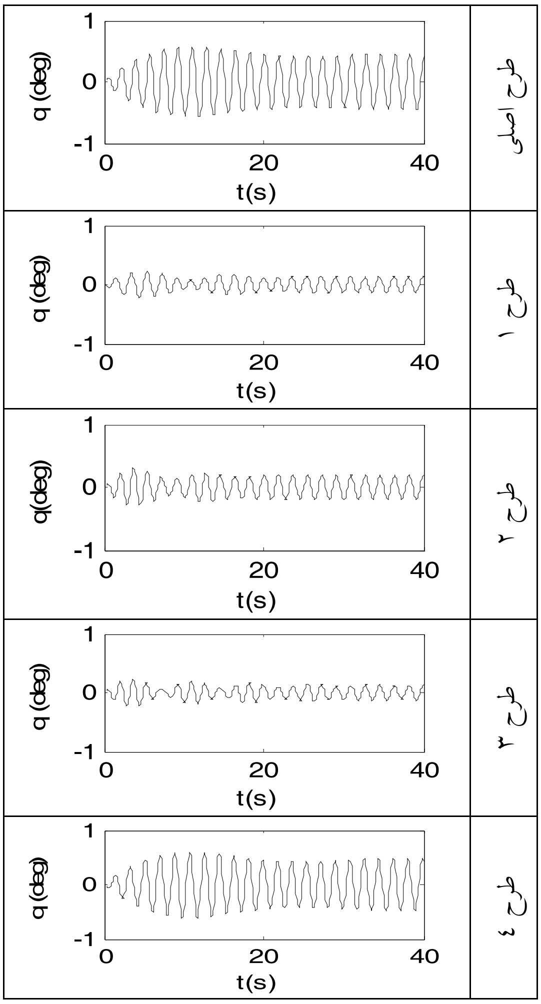


شکل ۱۷ تغییر شکل عرضی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی





شکل ۱۸ تغییر شکل جانبی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی



شکل ۱۹ تغییر شکل پیچشی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی

در شکل (۱۸) که دامنهٔ نوسان جانبی نوک پره نشان داده شده است، قابل مشاهده است که تغییر در سطح مقطع برج و نیز کاهش طول پره‌ها کاهش دامنهٔ تغییر شکل جانبی نوک پره را در بر داشته است.

در شکل (۱۹) تغییر شکل پیچشی نوک پره رسم شده است و بیانگر آن است که کاهش طول پره‌ها و تغییر سطح مقطع برج موجب کاهش دامنهٔ تغییر شکل پیچشی نوک پرهٔ سازهٔ توربین باد گشته است.

ارتعاش اجباری میرا تحت تحریک تکیه‌گاهی اتفاقی. در ارتعاشات اتفاقی با در دست داشتن تابع مختلط فرکانسی به تحلیل سیستم پرداخته می‌شود. بدین منظور تحریکی نمایی مطابق رابطهٔ (۱۷) بر سیستم اعمال می‌گردد [14].

$$y_i = a_0 e^{i\omega t} \tag{۱۷}$$

سپس پاسخ سازه به‌صورت ضریبی از تابع تحریک و با تأخیر زمانی ψ در نظر گرفته شود، آن‌گاه رابطهٔ بین تابع پاسخ δ و تابع تحریک به‌صورت رابطهٔ (۱۸) بیان می‌گردد.

$$\delta_0 e^{i\omega t} = H(\omega) a_0 e^{i\omega t} \tag{۱۸}$$

که در آن $H(\omega)$ تابع مختلط فرکانسی سیستم می‌باشد، که در سیستم‌های چند درجه آزادی به فرم ماتریسی می‌باشد.

در ارتعاشات اتفاقی سیستم‌های چند درجه آزادی با در دست داشتن تابع چگالی طیفی تحریک به فرم $[S_F(\omega)]$، می‌توان تابع چگالی طیفی مودال شدهٔ تحریک $\left[S_f(\omega)\right]$ را به‌صورت رابطهٔ (۱۹) پیش‌بینی نمود.

$$\left[S_f(\omega)\right] = [u]^T [S_F(\omega)][u] \tag{۱۹}$$

با استفاده از رابطهٔ (۱۹) که ماتریس چگالی طیفی مودال شدهٔ تحریک بیان شده است و نیز به‌کارگیری ماتریس جرم قطری شده سیستم $[\mathrm{M}]_m$، تابع خود همبستگی پاسخ سیستم در مود i ام به‌صورت رابطهٔ (۲۰) به‌دست می‌آید.

$$\mathrm{R_{qi}}(\tau) = \frac{1}{2\pi}\left([\mathrm{u}]_\mathrm{i} \int_{-\infty}^{+\infty} [\mathrm{M}]_\mathrm{m}^{-1} [\mathrm{H}^*(\omega)] [\mathrm{S_f}(\omega)][\mathrm{H}(\omega)][\mathrm{M}]_\mathrm{m} e^{i\omega\tau} d\omega [\mathrm{u}]_\mathrm{i}^\mathrm{T}\right) \tag{۲۰}$$

در نهایت با صفر قرار دادن τ در رابطهٔ (۲۰)، میانگین مربعی پاسخ در مود i ام به‌صورت رابطهٔ (۲۱) به‌دست می‌آید.

$$\mathrm{R_{qi}}(0) = \frac{1}{2\pi}\left([\mathrm{u}]_\mathrm{i} \int_{-\infty}^{+\infty} [\mathbf{M}]_\mathrm{m}^{-1} [\mathrm{H}^*(\omega)] [\mathrm{S_f}(\omega)][\mathrm{H}(\omega)][\mathbf{M}]_\mathrm{m} d\omega [\mathrm{u}]_\mathrm{i}^\mathrm{T}\right) \tag{۲۱}$$

بدین صورت سیستم تحت تحریکات اتفاقی بررسی می‌گردد.

در ادامه مدل اصلی سازهٔ توربین باد محور افقی تحت پنج تحریک اتفاقی قرار داده شده و پاسخ‌های آن استخراج شده است. این تحریکات عبارت اند از: نویز سفید، لرزه ثبت شده در مرکز سی دی ای مکزیکو سال ۱۹۸۵، لرزهٔ ثبت شده در مرکز اس سی تی مکزیکو سال ۱۹۸۵، لرزهٔ ثبت شده در مرکز وایترنرو سال ۱۹۸۷ و لرزهٔ ثبت شده در مرکز نیسکوالی سال ۲۰۰۱. توابع خود همبستگی لرزه‌های مذکور به‌صورت رابطهٔ (۲۲) مدل‌سازی و استفاده شده‌اند و توابع چگالی طیفی خود همبستگی تحریک سازه به‌دست آمده است [17].

$$R_y(\tau) = e^{-\varrho\left(2\pi\left(\frac{\tau}{T_s}\right)\right)} \cos\left(2\pi \frac{\tau}{T_s}\right) \tag{۲۲}$$

ضرایب مجهول در رابطهٔ فوق در جدول (۳) آمده است.

سپس با استفاده از توابع چگالی طیفی خود همبستگی به‌عنوان تحریک سازه و استفاده از روابط ذکر شده، سیستم تحت تحریکات فوق تحلیل شده و میانگین مربعی پاسخ سازه به‌صورت جدول (٤) تهیه شده است.

جدول ٤ میانگین مربعی پاسخ مدل اصلی به تحریکات اتفاقی (واحد متر مربع)

جابه‌جایی	نویز سفید	سی دی ای مکزیکو	اس سی تی مکزیکو	نیسکوالی	وایتر نرو
جابه‌جایی نوک برج	٣١٨/٢٢٩٠	٨/٧٦٢٧ e(-٤)	١/٥٠٥٣ e(-٤)	١/٤٦٦٨ e(-٤)	٦/٤٩٨٣ e(-٦)
جابه‌جایی طولی نوک پره	٢٤٠/٥٢٢٨	٦/٩٢٦٢ e(-٤)	١/١٨٢٢ e(-٤)	١/١٥١٩ e(-٤)	٥/١٠٣٢ e(-٦)
جابه‌جایی عرضی نوک پره	٣٠٧/٢٠٣٩	٨/١٨٩٠ e(-٤)	١/٤١٢٧ e(-٤)	١/٣٧٦٦ e(-٤)	٦/٠٩٨٦ e(-٦)
جابه‌جایی جانبی نوک پره	٢٦٩/٥٣٩٤	٦/٧٣١٥ e(-٤)	١/١٧٤١ e(-٤)	١/١٤٤٠ e(-٤)	٥/٠٦٨٣ e(-٦)
جابه‌جایی پیچشی نوک پره	٢٨٣/٩٤٠٧	٧/٦٩٩٩ e(-٤)	١/٣٢٥٦ e(-٤)	١/٢٩١٠ e(-٤)	٥/٧٢٢٥ e(-٦)

جدول (٤) بیان می‌کند، میزان میانگین مربعی پاسخ سازه نسبت به تحریک اتفاقی حاصل از لرزش در مرکز سی دی ای مکزیکو بیشترین مقدار را دارا است. این مقدار به‌ترتیب تحت تحریک به لرزش در مرکز سی دی ای مکزیکو، اس سی تی مکزیکو، نیسکوالی و وایتر نرو کاهش یافته است. در مقدار میانگین مربعی پاسخ علاوه بر مدت زمان لرزش تکیه‌گاه، عواملی نظیر شدت و تعداد دفعات تغییر جهت راستای تحریک و مقدار دامنهٔ تحریک، نیز می‌توانند مؤثر باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش دینامیک سازهٔ توربین باد محور افقی با استفاده از تئوری تیر جدارنازک و به‌کمک روش اجزای محدود بررسی شده که شامل تحلیل ارتعاشات آزاد و اجباری سازهٔ توربین باد و بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی بوده است. در نهایت این پژوهش منجر به ایجاد برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب شد، که قابلیت تحلیل هر نوع توربین باد محور افقی را دارا است. نتایج حاصل از تحلیل به شرح زیر است.

افزایش طول پره موجب کاهش فرکانس‌های طبیعی سازه و افزایش سطح مقطع برج موجب افزایش فرکانس طبیعی اول سازه شده و بر روی فرکانس‌های طبیعی پره‌ها اثر محسوسی نداشته است. به‌علاوه افزایش مدول الاستیسیته، مدول برشی و چگالی مواد سازندهٔ پره‌ها موجب افزایش فرکانس‌های طبیعی پره‌ها شده است. از طرفی افزایش چگالی پره‌ها منجر به افزایش جرم مؤثر در بالای برج شده که این امر فرکانس طبیعی اول سازه را به‌شدت کاهش می‌دهد.

افزایش طول پره‌ها موجب کاهش مقدار دامنهٔ پاسخ نوک برج، افزایش مقدار پاسخ عرضی نوک پره‌ها و افزایش اندازهٔ پاسخ جانبی نوک پره‌ها تحت تحریکات نیرویی شده است. افزایش سطح مقطع برج موجب کاهش جابه‌جایی نوک برج و تغییر شکل عرضی پره‌ها شده، درحالی که بر تغییر شکل جانبی نوک پره‌ها تحت تحریکات نیروی تقریباً بی‌اثر بوده است.

اثر تغییر سرعت جریان آزاد باد بر روی سازه ناچیز بوده است. این در حالی است که تغییر سرعت دورانی پره‌ها اثر بسیار زیادی بر پاسخ سازه داشته و افزایش آن مقدار پاسخ سازه را به‌شدت افزایش می‌دهد.

در مدل اصلی، مدل با طول افزایش یافتهٔ پره‌ها که فرکانس‌های طبیعی اول سازه در آنها نزدیک به فرکانس تابع تحریک هارمونیک بوده‌اند، پدیدهٔ تشدید به‌طور واضح در پاسخ نوک برج ظهور کرده است.

در تحریکات تکیه‌گاهی اتفاقی ناشی از لرزش‌های تکیه‌گاهی عوامل متعددی نظیر مدت زمان تحریک، شدت تحریک، دامنه و میزان تغییر جهت تحریک در یک بازهٔ زمانی، نقش مهمی در مقدار میانگین مربعی پاسخ سازه دارند.

فهرست علائم و نشانه‌ها

$dP.dT$	کار مجازی نیروی برا و پسا
l^e	طول المان
$ox_1y_1z_1$	مختصات سطح مقطع تیر جدارنازک
q, q'	بردار جابه‌جایی و مشتق آن
q_b ,q_t	بردار جابه‌جایی پره و برج
$u.v.w$	تغییر شکل تیر در راستاهای x_1, y_1, z_1
H	ارتفاع برج
$H.H_1.H_2$	ماتریس توابع شکل المان‌ها و مشتقات آن
$H(\omega)$	ماتریس تابع مختلط فرکانسی
L	فاصله از محور برج تا صفحۀ دوران روتور
M_r	جرم کلی در مد r ام
$S_F(\omega)$	تابع چگالی طیفی تحریک
T_f	ماتریس انتقال تغییر شکل جسم کشسان
T_r	ماتریس انتقال صلب
T_{br}	ماتریس انتقال از سیستم مختصات پره به سیستم مختصات روتور
T_{rn}	ماتریس انتقال از سیستم مختصات روتور به سیستم مختصات موتور
T_{no}	ماتریس انتقال از سیستم مختصات موتور به سیستم مختصات برج
ε_{xs}	کرنش برشی تیر جدارنازک
$\eta.\xi$	مختصۀ نقطه P در سیستم مختصات سطح مقطع
$\eta\xi\chi\tau$	سیستم مختصات سطح مقطع تیر جدارنازک پس از تحمل تغییر شکل کشسان
φ	زاویۀ دوران صلب

مراجع

1. Chopra, I. and Dugundji, J., "Nonlinear dynamic reponse of wind turbine blade", *Journal of sound and vibration*, Vol. 63(2): pp. 265-286, (1997).
2. El Chazly, N.M., "Static and dynamic analysis of wind turbine blades using the finite element method", *Computers & Structures*, Vol. 48(2): pp. 273-290, (1993).
3. Younsi, R., El Batanony, I., Tritsch, J., Naji, H. and Landjerit, B., "Dynamic study of wind turbine blade with horizontal axis", *Eur. J. Mech. A/Solids*, Vol. 20: pp. 241-252, (2001).
4. Baumgart, A., "A mathematical model for wind turbine blades", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251(1):pp. 1-12, (2002).
5. Murtagh, P.J., Basu, B. and Broderick, B.M., "Along wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading", *Engineering Structures*, Vol. 27: pp. 1209-1219, (2005).
6. Park, J.H., Park, H.Y., Jeong, S.Y., Lee, S., Shin, Y.H., and Park, J.P., "Linear vibration analysis of rotating wind turbine blade", *Current Applied Physics*, Vol. 10: pp. S332-S334, (2009).
7. Baxevanou, C.A., Chaviaropoulos, P.K., Voutsinas, S.G., and Vlachos, N.S., "Evaluation study of a navier stokes CFD aeroelastic model of wind turbine airfoils in classical flutter", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 96: pp. 1425-1443, (2008).
8. Hoogedoorn, E., Jacobs, G.B., and Beyene, A., "Aero elastic behavior of a flexible blade for wind turbine application: A 2D computational study", *Energy*, Vol. 35: pp. 778-785, (2010).

9. Wang, J., Qin D. and lim, T.C., "Dynamic analysis of horizontal axis wind turbine by thin walled beam theory", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 3565-3586, (2010).
10. Liu. G.R. and Quek. S.S., "*The finite element method a practical course*", Butterworth-Heinemann, London, England, (2003).
11. Shabana, Ahmed A., "*Dynamics of multi-body system*", Cambridge University Press, New York, USA (2005).
12. Radcliffe, C.W. and Sush, H., "*Kinematics and Mechanisms Design*", John Wiley & Sons Inc, New Jersey, USA, (1987).
13. Potter M., Wiggert D., "*Fluid mechanics*", The McGraw-Hill Company,Michigan, US (1976).
14. Newland, D.E., "*An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis*", John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, (1975).
15. Lutes, D.L. and Sarkani, S.H., "*Random vibrations analysis of structural and mechanical systems*", Elsevier, Washington, USA (2004).
۱۶. مکانیک، ابوالقاسم، "ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی و سازه‌ای با کاربردهای کامپیوتری"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، (۱۳۸۲).
17. Saragoni, G.R. and Ruiz, S., "Free vibration of soils during large earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29:pp. 1-16, (2009).
18. Dowell, E.H. and Hodges, D.H., "Nonlinear equation of motion for the elastic bending and torsion of twisted non-uniform rotor blades", NASA TN-7818. (1974).
19. Somers, D.M., Design and experimental results for the S809 Airfoil., NREL/SR-440-6918, 199۹